近地天体预警防御综述*

杨志涛[1,2,3]， 刘 静[1,2]

(1. 中国科学院国家天文台，北京，100101；2. 国家航天局空间碎片监测与应用中心，北京，100101；3. 中国科学院大学，北京，100049)

摘 要：近地天体数量多且撞击危害大，对其进行预警防御是有效应对其撞击威胁的基本手段，具体的预警防御技术已成为国际研究热点。中国现已加入专门负责近地天体预警防御的国际组织，但具体研究多处于起步阶段。详细阐述了发展近地天体预警防御技术的必要性及基本的应对流程，阐述了搜索监测、国际组织及其技术研究、深空探测项目等各方面的国际研究进展情况，简要分析了轨道偏转防御的基本策略和核爆、动能撞击、引力牵引、改变太阳光压及激光剥蚀等 5 种主要防御手段的原理及优缺点，总结了近地天体预警防御领域未来工作的四个重点方向。最后针对我国的研究现状提出几点建议和思考。

关键词：近地天体防御；轨道偏转；动能撞击；空间任务规划建议组

中图分类号：P185.7　**文献标识码：**A　**文章编号：**

0 引言

2013 年 2 月发生的车里雅宾斯克事件引起了国际社会对近地天体撞击威胁的高度关注，并促成两个专门负责近地天体撞击威胁的国际组织的成立：国际小行星预警网（IAWN）和空间任务规划建议组（SMPAG）。2017 年 10 月在我国香格里拉上空发生的火流星事件使得近地天体撞击地球事件迅速成为我国公众关注的热门话题。2018 年 1 月，中国加入 IAWN 和 SMPAG 成为两个组织的正式成员，近地天体预警防御现已成为急需加强的研究领域。

近地天体[1]（NEO）是轨道近日点在 1.3AU 以内的太阳系小天体，包含小行星和彗星两类天体，其中近地小行星（NEA）占绝大多数。与地球轨道的最近距离在 0.05 AU 以内且绝对星等在 22 等以内（相当于直径大于 140 米）的近地小行星被定义为潜在威胁小行星(PHA)，是对地球威胁性较高的一类近地天体。截止 2019 年 3 月 13 日，据小天体中心（MPC）公布已发现近地天体的数目[2]如下表所示，近地小行星数目已达 19775 颗，其中直径在 1 千米以上者有 895 颗，潜在威胁小行星有 1974 颗，此外已发现的近地彗星（NEC）数目有 107 颗。

近地天体物质组成等特征参量的获取对风险分析和防御效果评估的准确性至关重要。根据光谱测量及反照率分布可以研究近地天体的物质组成。目前的分类研究把小行星分为 S、C、X 三大类以及一些次要的异常类型[3]，如 S 型小行星的表面主要成分为硅酸盐与金属铁，C 型富含碳质和有机质成分，类似于碳质球粒陨石。

本文第二章介绍近地天体对地球构成威胁的原因及目前的应对方式； 第三章介绍与近地天体预警防御相关的国际组织及其研究计划、主要的 5 种防御技术手段、 防御相关的深空探测项目以及防御工作可能面临的法律问题；第四章基于现阶段能力梳理了未来工作的四个重点方向；最后在第五章进行总结并提出几点发展建议。

*基金项目：国家自然科学基金（11503044）；空间碎片研究专项（KJSP2016010101, KJSP2016020201, KJSP2016020301, KJSP2016020101）
收稿日期：　；　修回日期：
作者简介：杨志涛（1986-），男，助理研究员，硕士，研究方向：近地天体预警及防御技术。Email: ztyang@nao.cas.cn

1 威胁及应对方式

1.1 威胁

近地天体对地球构成撞击威胁的原因在于：首先，近地天体的运行轨道与地球轨道接近，的确存在与地球发生碰撞的可能；其次，近地天体与地球的相对速度高达几十公里每秒，一旦碰撞会产生巨大的撞击能量，易造成较大的灾难；最后，近地天体数量很多且目前绝大部分尚未发现，潜在撞击风险较高。

撞击风险真实存在。1994 年彗木相撞以及月球和火星上观测到新陨石坑均说明太阳系内小天体撞击事件的发生并非个例。6500 万年前的生物大灭绝很可能是由近地天体撞击造成，而 2013 年 2 月 15 日发生的车里雅宾斯克事件确是小行星撞击[4]，造成约 1500 多人受伤，数千栋建筑受损。此外，据国际小行星预警网（IAWN）发布的信息，自 2016 年 6 月起至今近地天体与地球的近距离交会（地月距离之内）事件已超过 100 次。

撞击事件危害大。据估计[5]，一颗直径 1 千米的小行星撞击地球便可产生 8 万 MT 的撞击能量并引发全球性灾难，可能导致地球文明的毁灭；一颗直径 100 米量级的小行星撞击地球可产生 80MT 的撞击能量，爆炸威力强于最强氢弹，可造成区域性的毁灭；即便 30 米大小的小行星撞击能量亦可达 2MT（注：$1MT=10^6$ 吨 TNT 炸药的爆炸能量），而 1945 年广岛核弹的爆炸能量仅约 0.02MT。同时，近地天体尺寸越小则数量越多，撞击概率亦越高。

未知目标的潜在撞击风险高。跟据 NASA 公布的报告[6]估计，百米量级的近地天体目前已发现数量仍不足理论预测数目的 20%，但其足以造成很大危害，因此构成很高潜在撞击风险。如下图[7]所示为不同尺寸近地天体的已发现数目（绿色，左轴）、理论预测数目（红色，左轴）及相应的搜寻完成比例（蓝色，右轴）。

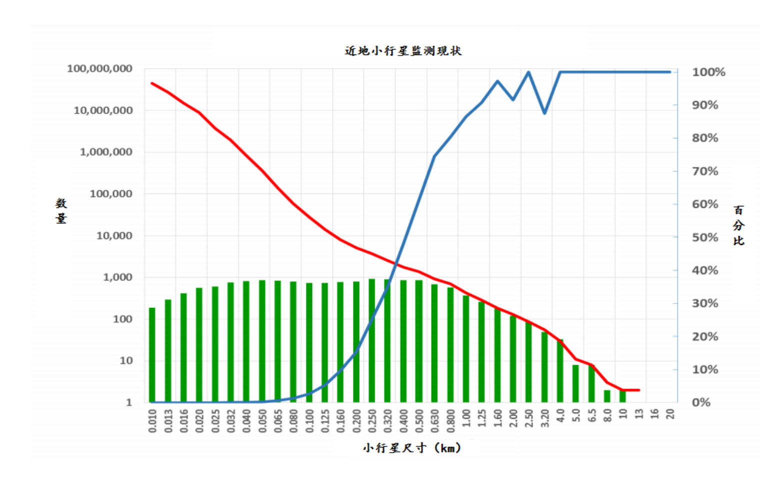


图 1 近地天体搜寻观测现状

Fig.1 NEOs’ search and observation status

1.2 应对方式

为了有效应对近地天体的撞击威胁，尽量避免或减缓此类撞击事件造成的危害， 首先需对近地天体进行搜索和跟踪监测，获得其轨道测量和特征测量数据； 其次基于对监测数据的处理实现对近地天体的编目管理，然后利用编目轨道数据和特征数据对近地天体的撞击风险进行评估，对危险事件发出预警， 最后在出现危险事件时需具备主动防御或被动应对的能力。应对流程示意图如下所示。

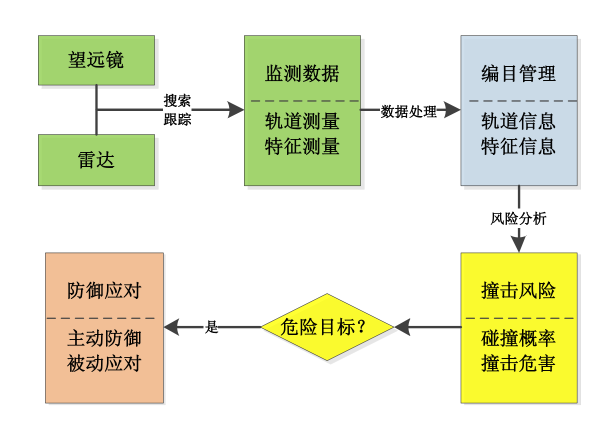


图 2 应对流程示意图

Fig.2 Respond schematic flow

1） 监测预警实例

目前的近地天体监测预警工作主要由小天体中心（MPC）和喷气动力学实验室（JPL）联合负责， MPC 接收数据并进行初步的数据处理和风险识别，JPL 对潜在的危险目标进行精密定轨和风险分析并对外发布危险结果，期间观测系统会持续地跟踪监测并上传数据。2008 年 10 月曾成功实现一次危险近地天体（临时编号为 2008TC3）的发现及预警。该天体于 10 月 6 日由卡特琳娜巡天望远镜发现，经计算将在 24 小时内撞向地球，并且研究人员于 10 月 7 日凌晨成功在预测地区拍到该小行星进入地球大气层的画面。幸运的是此行星尺寸较小，在大气层中烧蚀解体后只产生一些很小的陨石，并未对造成什么危害。

2） 预警防御难点

现有探测能力不足，编目比例低。百米级的近地天体便可对地球造成重大危害，但目前已发现和编目的比例仍然很低，其主要原因是探测能力不足。近地天体探测的主力是地基光学望远镜，面临的探测难点在于：①近地天体大多时间距离地球很远，且尺寸越小所占比例越高，故多数亮度很低难以探测；②地基望远镜受天光背景影响只能在晚上观测，故无法观测从昼半球方向靠近的天体，尤其对于地球轨道内的天体，因始终在昼半球而难以探测；③近地天体运动特性的特殊性也给地面观测带来了更多技术挑战，例如近距离交会时其角速度可能与高轨空间碎片相近因此难以甄别。

新发现天体监测数据少，预警误差大。近地天体新发现时（几天内）监测数据只覆盖其轨道周期（年的量级）的很小一段，且望远镜观测只能定向无法定位，即使测角精度可以达到很高水平[8]，在缺少距离约束的情况下轨道确定精度仍然有限。此外，由于近地天体的物理特征信息比轨道信息更难获得，对于已有轨道编目的近地天体，仍有较高比例并未获得准确特征信息。因此有很多（尤其是新发现）近地天体的预警风险分析结果误差偏大。

防御技术不够成熟。目前已被提出且研究较多的近地天体防御策略包括核爆、动能撞击、改变太阳光压、激光剥蚀、引力牵引等多种技术手段。 其中仅动能撞击技术较为成熟，其它各种方法多在理论研究阶段，而核爆技术同时面临着较大的法律困境。即便是动能撞击技术，亦因受到近地天体尺寸、结构等特征信息不精确的制约而难以准确评估防御效果。

2 国际研究现状

由于近地天体数量很多，搜索发现和跟踪监测任务重难度高，需要全球联合观测以提高观测效率和实效性(尤其对于类似车里雅宾斯克事件的“突袭者”)；同时由于撞击威胁大且撞击时间和地点难以准确预测，同样需要各国采取联合应对措施。因此，国际合作是人类应对近地天体撞击威胁的必然选择。目前已有专门的国际组织负责近地天体预警和防御相关的工作，例如曾经的近地天体行动组（AT-14）、国际小行星预警网（IAWN）和空间任务规划建议组（SMPAG）。 此外也有一些防御相关的项目是由多国联合研究或研发，例如美欧联合开展的小行星撞击偏转评估任务（AIDA）。

2.1 国际组织

近地天体行动组。受 1994 年发生的彗木相撞事件影响，由联合国外层空间事务办公室（UNOOSA）组织，1995 年在纽约联合国总部举行了第一次 近地天体国际会议，会议明确提出近地天体对地球的潜在威胁，并提议加强现有的近地天体监测能力以搜索并跟踪近地天体， 此外还提出需要评估大中型近地天体撞击的可能性。1999 年，近地天体撞击威胁问题在第三次联合国探索与和平利用外层空间会议上得到进一步关注。该次会议形成的"维也纳空间与人类发展宣言"（维也纳宣言）包含 33 项具体建议，其中一项建议是增强与近地天体有关行动的 国际合作与协调。此后，为执行维也纳宣言中有关近地天体的建议，和平利用外层空间委员会（COPUOS）于 2001 年设立了 近地天体行动小组（AT-14），该行动小组负责协调关于近地天体撞击威胁的国际减缓应对的行动， 后于 2015 年被认为已成功完成协调近地天体威胁的国际减缓应对的任务并正式解散。

国际小行星预警网和空间任务规划建议组。在 2013 年 2 月发生车里雅宾斯克事件后，2013 年 12 月联合国大会第 68 次会议正式签署成立国际组织 IAWN 和 SMPAG（中国于 2018 年 1 月底正式加入）。 IAWN 负责近地天体的发现、跟踪、编目、特征分析等工作，并不定期组织开展国际联测活动，在提高对所选近地天体编目及预警精度的同时提升国际联测的协调应对能力。如 2017 年 10 月对小行星 2012TC4 的国际联测活动， 成功获得大量观测资料并计算得到其精密轨道，排除了 100 年内撞击地球的可能性。SMPAG 则负责近地天体防御应对相关的工作，具体职责包括： 1）掌握各国航天局和组织的相关活动； 2）确定今后工作中需要重视的行星防御空间飞行任务相关的技术和科学活动； 3）制定/更新未来任务的国际战略和与支持行星防御任务研究与开发的工作； 4）分析和报告国际合作的有效性，并资助行星减缓活动。

2.2 研究项目

2.2.1 SMPAG 任务计划

为了有效地开展并促进近地天体防御相关的技术研究，SMPAG 组织将涉及的工作划分为 11 项任务计划， 为各项计划确定牵头组织以推进相关研究，并要求研究组织在 SMPAG 会议（大约每年两次）中汇报各自的研究进展。 这 11 项任务计划基本涵盖了近地防御流程中可能涉及的所有环节（如下表所列），包括开始响应或采取行动所需的标准或阈值（任务 1）、 减缓任务的类型和技术（任务 2-4）、 有威胁时的行动计划和协调方法（任务 5-6）、 基于现状对未来工作路线的梳理（任务 7）、 对减缓任务所带来后果的预研（任务 8）、 对近地天体进行轨道偏转时需采取的标准（任务 9）、 对核能选项的可行性研究（任务 10） 以及主动防御所需载荷（包含火箭、航天器及其中搭载的载荷）特征的预研（任务 11）。目前任务 1 已形成初始报告，NASA 建议响应阈值为：（1）对于所有撞击概率大于 1%且尺寸在 10 米以上（近似于绝对星等达到 28 等或者更亮）的近地天体，IAWN 需发出警报；（2）对于 20 年内撞击概率大于 10%且尺寸在 20 米以上（近似于绝对星等达到 27 等或者更亮）的近地天体，需要制定防御计划并开始地基的相关准备工作；（3）对于 50 年内撞击概率大于 1%且尺寸在 50 米以上（近似于绝对星等达到 26 等或者更亮）的近地天体，SMPAG 需启动相应的防御任务。

表 1 SMPAG 11 项任务计划

Table 1 Task plan of SMPAG

任务序号	任务计划名称	牵头组织
1	撞击响应行动的标准和阈值	NASA（美国）
2	要考虑的减缓任务类型和技术	UKSA（英国）
3	威胁场景及其对应任务类型	ESA（欧盟）
4	不同近地天体威胁场景的参考任务	ASI（意大利）
5	存在可信威胁时的行动计划	NASA / IAA（国际宇航科学院）
6	存在可信威胁时的通信协调指南	NASA（美国）
7	行星防御未来工作路线图	DLR（德国）

8	近地天体减缓任务的后果（含失败情况）	ESA（欧盟）
9	近地天体轨道偏转的标准	ROSA（罗马尼亚）
10	核能选项的研究	待定
11	载荷特征分析工具箱	CNES（法国）

2.2.2 防御策略研究

近地天体防御的难度与其尺寸、质量、轨道状态及预警时长等等因素密切相关。对于预警时间较短，类似车里雅宾斯克事件中突然出现的危险天体，目前只能基于地基设备进行近地空间防御。若预警时间较长（如几年或几十年），则近地天体防御策略的实施可分为两个阶段：一是行星际轨道转移，即发射航天器从地球到达近地天体附近的过程；二是具体防御技术的实现。 近地天体防御技术又可分为两种：一是轨道偏转，即改变危险天体的轨道使其避开地球；二是碎裂，即使得危险天体分裂成碎片，充分降低或完全消除危险天体撞击地球的危害。行星际轨道转移技术相对而言已较为成熟，美欧日俄（苏）等国家或组织均已成功开展过深空探测项目，中国亦有嫦娥二号曾飞跃探测图塔蒂斯小行星，在具体任务执行阶段天文自主导航[9]亦将是关键技术之一。防御技术包括核爆、动能撞击、引力牵引、改变太阳光压、激光剥蚀等多种技术手段，其中仅动能撞击技术成熟度相对较高。

0） 轨道偏转策略

近地天体与地球的最小交会距离通常用 MOID 表示。轨道偏转的目的是通过在交会时刻t_{MOID}之前的某一时刻t_d开始采取措施改变近地天体的轨道。具体措施又可分为瞬时脉冲变轨方法（如动能撞击、核爆等）和连续推力变轨方法（如引力牵引、改变太阳光压、激光剥蚀等）两类。用$\delta\sigma=\left[\delta a\ \ \delta e\ \ \delta i\ \ \delta\Omega\ \ \delta\omega\ \ \delta M\right]^T$和$\delta\vec{r}=\left[\delta s_r\ \ \delta s_\theta\ \ \delta_h\right]^T$分别表示在轨道偏转策略的影响下，在交会时刻$t_{MOID}$近地天体的轨道根数$\sigma$及其相对地球位置矢量$\Delta\vec{r}=\left[\Delta s_r\ \ \Delta s_\theta\ \ \Delta_h\right]^T$的变化量，二者的关系[10]如下式所示：

$$\begin{cases}\delta s_r\approx\dfrac{r}{a}\delta a+\dfrac{ae\sin f_{MOID}}{\eta}\delta M-a\cos f_{MOID}\delta e\\ \delta s_\theta\approx\dfrac{r}{\eta^3}\left(1+e\cos f_{MOID}\right)^2\delta M+r\delta\omega+\dfrac{r\sin f_{MOID}}{\eta^2}\left(2+e\cos f_{MOID}\right)\delta e+r\cos i\delta\Omega\\ \delta s_h\approx r\left(\sin\lambda_{MOID}\delta i-\cos\lambda_{MOID}\sin i\delta\Omega\right)\end{cases}\tag{1}$$

其中$\eta=\sqrt{1-e^2}$， f_{MOID}表示t_{MOID}时刻的真近点角，$\lambda_{MOID}=\omega+f_{MOID}$，下标$r,h$分别表示径向和轨道面法向，$\theta$表示轨道面内与径向垂直的方向，且$\left(\hat{r},\hat{\theta},\hat{h}\right)$构成右旋坐标系。轨道偏转策略的目标是要使如下评价函数J达到最大。

$$J=\left(\Delta s_r+\delta s_r\right)^2+\left(\Delta s_\theta+\delta s_\theta\right)^2+\left(\Delta_h+\delta_h\right)^2\tag{2}$$

轨道根数的变化量$\delta\sigma$则取决于不同的偏转技术。对于脉冲变轨方法，近地天体在“瞬时”受外力作用而产生速度变化，同时轨道发生改变；对于连续推力变轨方法，相当于近地天体在一段时间内（持续时间

取决于防御策略实施情况）始终受到一个摄动力的影响，因而轨道发生缓慢变化。在制定偏转策略时，首先基于近地天体和太阳构成的二体模型进行初始的方案设计，然后在考虑完整轨道摄动作用力的情况下优化得到精密的轨道偏转策略，其中可考虑采用一些较新的优化算法（如遗传算法、粒子群算法或机器学习算法等）。

1）核爆。利用核装置直接炸碎危险天体，或利用核爆产生的推力改变危险天体的轨道，避免其与地球相撞。核爆可分为非接触式爆炸和接触式爆炸，具体方式的选择主要由危险天体的尺寸和组成决定。非接触式爆炸是指核装置在危险天体上空引爆，并不与其接触，爆炸释放的能量在星体表面产生高温，星体表面物质被高温蒸发并从喷射出来，基于动量守恒原理，危险天体将会被推向喷射物运动的反方向，偏离原有的轨道。接触式爆炸是指核装置在近地天体的表面或内部引爆，如此可使危险天体碎裂。接触式爆炸的能量使用率高，但同时难度也高：一是引爆条件要求高，需要提前撞击危险天体或着陆后打洞，准确安置核装置后再依计划引爆；二是爆炸后的碎裂效果难以控制，爆炸产生的碎片撞击地球同样有可能造成危害。

2）动能撞击。动能撞击是通过使用一颗或多颗航天器以很高的相对速度直接撞击危险天体以改变其运行轨道，使其不再与地球相撞。动能撞击的本质是动量守恒原理，近地天体速度变化大小取决于航天器的质量、撞击速度及动量转移系数。航天器质量取决于发射质量和轨道转移过程中的质量消耗，撞击速度则与转移轨道的设计密切相关，动量系数则决定了动能撞击的效率，其值与目标天体的物质组成、形状、结构等特征参量密切相关，而这些特征参量通常难以精确获知（尤其是预警期较短的天体）。相对而言，动能撞击是目前可行性最高的方案之一，其优点在于：（1）技术成熟度高，在美国的“深度撞击”任务中已有初步验证；（2）灵活性好，在深空或近地空间均可开展，可适用于不同的预警时长，甚至在紧急情况下亦有望实施。

3）引力牵引。引力牵引是将航天器驻留在距离目标天体一定距离的轨道上，通过万有引力缓慢改变其轨道。此方法的优点是只要知道近地天体质量即可，不需要考虑其物质组成、结构、自转等其它特征信息；其主要挑战在于需要进行长期可靠的轨道控制。此外，引力大小主要取决于航天器和目标天体的质量，若增大航天器质量则会快速增加发射成本。此外还有“增强型引力牵引”方案，即让航天器在引力牵引的同时从目标天体收集物质以增强自身的引力场，但这需要掌握从近地天体成功收集物质且避免航天器被碎石砸坏的新技术，并且需满足更高的轨道控制要求。

4）改变太阳光压。太阳光压也是影响近地天体轨道变化的主要摄动源之一，因辐射源即为中心天体（太阳），因此近地天体所受光压力为一中心斥力，其大小与目标天体的反照率、光照面积及太阳光辐射强度均成正比。通过改变近地天体所受光压作用力的大小同样可以改变其运行轨道，具体方法包括：（1）在天体表面喷涂特定的涂层以改变其反照率；（2）在天体表面放置太阳帆以增大光照面积；（3）在空间部署一个或多个反射器以增强作用在目标天体的太阳光辐射。由于太阳光压作用力通常很小，用于改变目标天体轨道需要很长时间，故该技术只适用于有很长预警时间的危险近地天体。

5）激光剥蚀。激光剥蚀技术是采用一个大功率激光系统照射近地天体表面，利用表面烧蚀产生的等离子体喷射所带来的反作用力改变目标天体的轨道。载有激光系统的航天器可以部署在月球或绕地轨道，小型的激光系统亦可发射至近地天体轨道附近，在引力牵引的同时对目标天体施加更大的作用力。激光剥蚀的作用力主要取决于激光发射功率的大小，对于近地天体防御所需的大功率激光系统，目前研究的技术成熟度仍然很低。

2.2.3 深空探测项目

深空探测对于提高近地天体防御能力意义重大，一是增强对近地天体物理特征的测量和认知，提高对目标天体风险估计和防御效果评估的精确度；二是检验与航天器深空轨道转移及小天体绕飞甚至着陆相关的轨道测量与控制技术，验证具体防御手段可到达的实际效果等。

美国 NASA 于 2005 年实施“深度撞击”（Deep Impact）任务，一颗撞击器以 10.2km/s 的速度撞击直径约 7.6 千米的坦普尔 1 号彗星并留下约 28 米的撞击坑，一定程度上验证了动能撞击技术（左下图是该彗星被撞击后 67 秒的图像）。2016 年发射的 OSIRIS-Rex 计划登陆小行星 Bennu 并采回 60 克到几公斤的样品（重量取决于探测目标的表面性质），该任务除提供关于 PHA 的特征数据外还可验证在小行星附近操控技术。

该航天器已于 2018 年 12 月到达贝努小行星附近并开始星表探测。

日本宇航局 JAXA 负责（德法等国参与）的隼鸟 2 号任务（Hayabusa-2）计划登陆近地小行星 Ryugu 采样并返回，将提供与偏转研究直接相关的数据。隼鸟 2 号于 2018 年 6 月成功实现绕飞小行星 Ryugu，并于 9 月 21 日成功释放出漫游者着陆器开始星表探测。

此外，由美欧联合开展的“小行星撞击和偏转评估”（AIDA）任务正在研制阶段。该项目的目标是研究和验证动能撞击的效果，测试航天器撞击能否成功使小行星轨道偏转以消除撞地威胁。该任务由两个独立的组成部分：美国负责研制用以撞击小行星 Didymos 的卫星 Didmoon 的航天器 DART 和欧空局主导的用于监测撞击事件的航天器 AIM。DART 计划于 2021 年发射，并在 2022 年实施撞击任务。AIM 原计划于 2020 年发射，但项目因资金问题在 2016 年被 ESA 取消，之后于 2018 年 ESA 提出发射航天器 Hera 的项目，计划于 2023 年发射并将在 2026 年与小行星 Didymos 交会并进行绕飞探测。

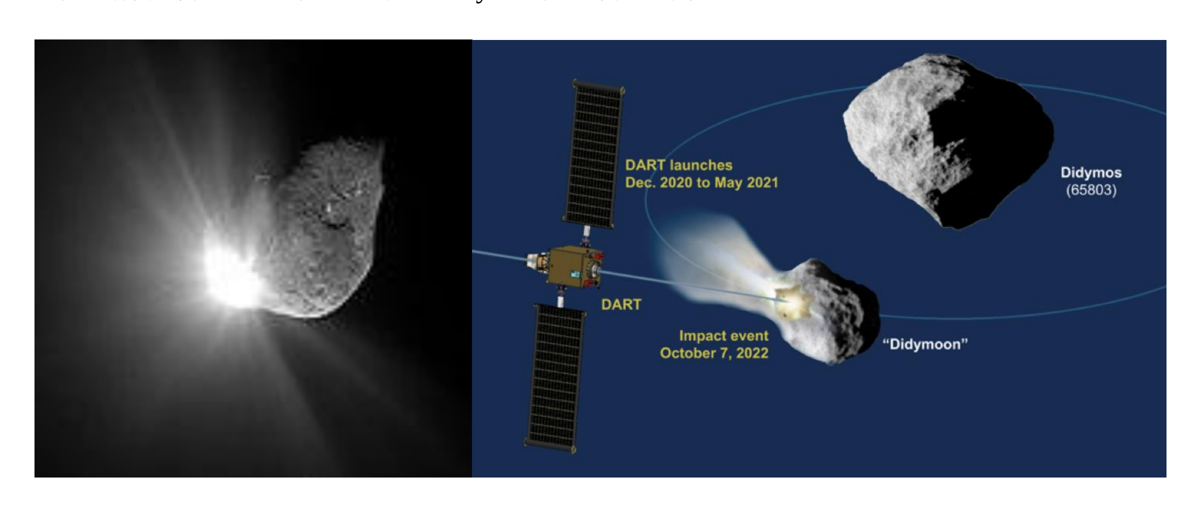


图 3 坦普尔 1 号彗星撞击 67 秒后图像（左）和 DART 任务示意图（右）

Fig.3 Image of Templer 1 comet 67 seconds after impacted（Left）and Diagram of project DART（Right）

2.2.4 法律问题

随着行星防御领域科学和技术的不断进步，近地天体防御工作可能面临的法律问题重要性日益凸显，需要在充分考虑目前科学技术和社会经济情况以及现有条约的前提下，努力制定或完善相关法律。 与近地天体防御相关的主要法律问题包括：（1）核武器的适用性问题。 近地天体防御是否包含核武器这一选项或许是目前最为突出的法律问题之一， 受《部分禁止核试验条约》、《全面禁止核试验条约》等国际条约的限制，采用核爆方式进行近地天体防御的策略将可能面临巨大的国际政治压力。（2）实施主动防御行动后可能面临的法律问题。在近地天体主动防御任务部分成功或完全失败的情况下，相应的法律责任或义务该如何划分和界定。 因为主动防御必然是一个涉及多个国家或地区、多学科领域和多种技术手段的复杂项目，所以导致任务不完全成功或者失败的原因可能有很多，例如计划不周、任务执行偏差、偏转实效不足、撞击点不理想等等各种可能的因素。同时，由于防御任务不完全成功可能造成的近地天体撞击带来的直接危害以及各种次生灾难（如地震、海啸等）。针对各种不同情况，参与各方应承担的法律责任或义务该如何划分和界定。

SMPAG 在 2016 年 2 月的第 6 次会议中同意设立一个专门的法律事务工作组，由空间法专家和科学家/工程师组成，就与执行近地天体偏转任务相关的法律问题进行讨论和提出建议， 以用于试验目的和紧急情况下行星防御的相关法律问题，其目标包括：（1）制定和优化相关法律问题以及 SMPAG 工作中需要澄清的问题；（2）考虑现有协议背景下的法律问题；（3）制定解决突出问题的行动计划。

3 未来工作重点

综合来看，近地天体预警防御领域未来的工作重点主要在于以下四个方面：

（1）提升搜索编目能力。搜索发现近地天体并对其进行编目管理是开展预警与防御工作的基础。由于百米量级的近地天体便足以造成严重危害而其发现比例尚不足 20%，因此需要提高监测能力以搜索发现和跟踪编目更多具有近地天体。美国 NASA 于 2007 年提出目标“至 2020 年完成 90%直径 140 米及以上近地天体的发现和编目管理”（GEB），并为此提出“大视场综合巡天望远镜”（LSST）的建造计划。按照最新的计划表，LSST 将于 2021 年建成并开始测试，2023 年起正式运行。根据模拟计算的结果，LSST 观测 12 年可完成目标 GEB。此外还有一个天基红外望远镜项目（NEOCam），计划发射至日地 L1 点，其目标是在 4 年内发现三分至二的潜在威胁小行星（PHA）。

（2）增强物理特征探测。掌握近地天体的物理特征是可靠地估计其对地面撞击影响以及设计有效行星轨道偏转任务的重要先决条件。尤其在发生预警时间较短的紧急情况时，快速获取威胁对象的相关特征参数值（形状，旋转速率，反照率，物质组成等）对防御应对至关重要。天体物理特征信息的采集依赖于主要望远镜（可见光和红外）和雷达等天文观测设备。为了尽量提高探测效率，应促进各观测台站的合作并协调优化总体观测策略，以最有效地利用现有观测设备。此外，通过深空探测任务进行近距离观测和特征分析，可显著增加我们对减缓相关的近地天体物理特征多样性的认知。例如目前正在进行中的隼鸟 2 号和 OSIRIS-Rex 任务。

（3）促进防御技术研究。对于近地天体轨道偏转技术的研究迄今为止更多地集中在动力学撞击器和引力牵引等方法上，这些方法在现有技术中是可行的，或者在几年内可能变得可行。然而，应鼓励和支持研究新的 NEO 偏转方法，诸如基于离子束推进技术的替代方法，激光消除等在未来技术开发过程中可能变得实用的方法。应将研究重点放在处理近地天体尺寸分布较小端（例如直径为 50 米-200 米）物体，这是大多数新发现并且对地球影响概率相对较高的尺寸范围。对于偏转之后的近地天体轨道演化：无论是试验任务还是实际应急响应，行星轨道偏转均将产生不确定的结果，有必要对所涉及的不确定性和可能的结果范围进行建模分析，覆盖从完全失败到偏转大于预期的各种情况，以了解后续影响。在发生紧急偏转的情况下需要知道偏转试验如何影响整体未来长期的撞击风险，在进行偏转试验任务的情况下，无论结果如何都不能显著增加测试目标对地球未来撞击的风险。

（4）开展偏转测试任务。理论和技术研究是基础，同样重要的是开展切实可行的试验任务，以使近地天体轨道偏转的防御技术能够在真实的危险目标上实现。通过实际的测试任务可验证和完善与偏转相关的空间技术，例如小行星轨道偏转策略所能达到的实际效果如何，如何确保靠近甚至着陆于弱引力且形状不规则的小行星所需要的自主导航与控制系统等，此类难题在地面实验室难以完全克服。如上文提到的小行星撞击偏转评估（AIDA）项目正是一个近地天体轨道偏转实验任务，此外在欧美多国联合的 NEOShield-2 项目提出一个成本相对较低的研究动能撞击的试验任务 NEOTωIST，计划发射一个小型的撞击器撞击小行星 Itokawa，撞击地点选在远离其旋转轴的地方，从而导致其旋转速率发生变化，进而研究动能撞击效率与近地天体自旋等结构特征之间的关系。上述研究结果，都有助于减少在紧急情况下执行偏转任务所需的科学和技术准备工作。

4 总结与建议

人类过去十几年在近地天体监测预警及防御应对方面取得了重大进展，但在国际社会能够充分保护地球免受灾难性小行星撞击之前，还需要做更多的工作。百米及以下尺寸的近地天体数量多且发现比例尚低，需要加强监测能力以实现对多数危险天体的编目管理能力；物理特征信息对准确的风险分析和防御效果评估至关重要，需要努力增强对近地天体特征信息的采集与分析；近地天体防御的多种技术手段成熟度偏低，需要继续加强理论与技术研究水平，包括对防御后总体风险的建模评估；理论的防御策略仍然需要通过实际的测试任务来验证和完善。虽然我国已于 2018 年 1 月底加入国际小行星预警网（IAWN）和空间任务规

划建议组（SMPAG），但目前我国在近地天体威胁应对方面的能力主要集中在搜索监测领域，例如盱眙的近地天体望远镜和丽江、兴隆等观测站的多台光学望远镜均可以开展近地天体的搜寻及监测工作，但与国外相比能力仍显不足，同时在预警防御领域的技术能力仍然比较薄弱，基本处于起步阶段。

本文建议从以下几方面加强我国在近地天体搜寻监测及预警防御领域的能力建设和科学技术研究：

（1）快速提升我国自主的暗弱目标监测能力，增强我国自主近地天体编目能力，以更早地发现尺寸更小或距离更远的目标，尽量避免危险天体的突然袭击。例如新建大口径光学望远镜、利用已有大口径射电望远镜（如 FAST）与雷达联测，进而提高对暗弱近地天体的探测能力。

（2）多方面促进我国在近地天体防御领域的基础科学与技术研究，增强技术储备和人才储备。近地天体撞击威胁是人类文明将长期面临的一个问题，而目前提出的多种近地天体防御手段均存在技术成熟度低或轨道偏转结果不确定性高等问题，同时新的技术方法从提出设想到能成熟实用亦需多年的工作积累，因此需要增强技术储备和人才储备，做好长期深入研究的准备。

（3）积极参与国际组织开展合作研究，在合作中学习国外的先进技术与管理经验，以提高我国自主近地天体威胁应对能力， 并增强我国在国际交流合作中的话语权；积极参与或加入法律事务工作组，在国际规则制定中维护国家利益。

参考文献

[1] NEO Basics, NEO Grouops. [NASA/JPL CNEOS][2017]. https://cneos.jpl.nasa.gov/about/neo_groups.html.

[2] Latest Published Data.[IAU/MPC] [2018]. https://minorplanetcenter.net/mpc/summary

[3] 徐伟彪, 赵海斌. 小行星深空探测的科学意义和展望[J]. 地球科学进展, 2005, 20(11):1183-1190.

XU Wei-biao, ZHAO Hai-bin. DEEP SPACE EXPLOATION OF ASTEROIDS: THE SCIENCE PERSPECTIVES [J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(11):1183-1190.

[4] Brown PG, Assink JD, Astiz L, et al. A 500-kilo-ton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors[J]. Nature, 2013, 503(7475): 238-241.

[5] Peter B，Hans R. Comet/Asteroid Impacts and Human Society[M]. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.

[6] Paul K. Martin, NASA's Efforts to Identify Near-Earth Objects and Mitigate Hazards. NASA Office of Inspector General, 2014, IG-14-030.

[7] Lindley Johnson, International Asteroid Warning Network Status Report to STSC 2017, presentation of 8th SMPAG meeting in Vienna, 2017.

[8] 王晓雯,曹锦,彭青玉. 近地小行星 Apophis 的天体测量试验观测[J]. 天文研究与技术, 2014,11(1):34-38.

Wang Xiaowen, Cao Jin, Peng qingyu. Preliminarily Astrometric Observations of NEO Apophis[J]. Astronomical Reserch & Technology. 2014,11(1):34-38.

[9] 薛喜平,张洪波,孔德庆. 深空探测天文自主导航技术综述[J]. 天文研究与技术, 2017,14(3):382-391.

Xue Xiping, Zhang Hongbo, Kong Deqing. An Overview of Celestial Autonomous Navigation Technology for Deep Space Exploration[J]. Astronomical Reserch & Technology. 2017,14(3):382-391.

[10] Massimiliano V, Camilla C. Optimal Impact Strategies for Asteroid Deflection[J]. Guidance, Control, and Dynamics, 2008, 31(4): 858-872.

Summary of near-Earth objects warning and defense

YANG Zhi-tao[1,2,3], LIU Jing[1,2]

（1. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100101, China;

2. Space Debris Observation and Data Application Center, CNSA, Beijing, 100101, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China）

Abstract: Because of the huge number and high relative speed, Near-Earth Objects pose a serious impact threat to the Earth. Early warning is an essential means to effectively deal with the threat, but the existing capacity is still not enough to fully protect the Earth from catastrophic impact. Since the occurrence of the Chelyabinsk incident in 2013, NEO defensive technology has become a hotspot in international research. China has now joined the SMPAG which is an international organization dedicated to the defense of near-Earth objects, but some specific research is still in its infancy. In this paper, the necessity and basic response process of developing NEO early warning and defense technology are expounded in detail. The international research progress of NEO surveys, international organization and its technical research, deep space exploration project and other aspects are expounded, and the orbital deflection defense is briefly analyzed. The basic strategy and the principles, advantages and disadvantages of five main defense techonolies such as nuclear explosion, kinetic impact, gravitational traction, changing solar light pressure and laser ablation. Then, it is concluded that the priorities for future work of NEO warning and defense are mainly: Improve search and cataloging ability, enhance physical feature detection, promote defense technology research and carry out deflection test tasks. Finally, some development suggestions are proposed, including rapid improvement of monitoring and cataloging capabilities, promotion of basic research in various aspects, and actively participate in and carry out international exchanges and cooperation.

Key words: Near-Earth Object Defense ; deflection; kinetic impact ; Space Missions Planning Advisory Group (SMPAG)